

## Математическое моделирование термодинамических процессов граничного трения

Разработана математическая модель процессов создания и разрушения смазочной пленки при граничном трении в зависимости от температуры на основе схемы создания адсорбированных и химически модифицированных граничных смазочных слоев

**граничное смазывание, образование и разрушение, термодинамическое равновесие, переходные температуры, самоорганизация**

### Введение

В настоящее время все больше научного внимания обращается на объяснение механизмов колоссального влияния смазочных материалов на долговечность трущихся деталей машин. С учетом того, что объемные свойства материалов практически исчерпали свое влияние на повышение износостойкости поверхностей реального контакта, необходимо сосредоточить внимание на новых подходах к проблемам «инженерии поверхности» в области технологий модификации трибоповерхностей. Свою значимость здесь имеют развивающиеся кинетические и термодинамические методы оценки смазочного действия масел [1-3]. Эти методы базируются на анализе механизмов действия, образования и разрушения граничных смазочных слоев при трении.

При трении в режиме граничной смазки способность смазки уменьшать трение и изнашивание определяется образованием на рабочих поверхностях прочных граничных слоев адсорбционного или химического происхождения со сниженным сопротивлением сдвигу по сравнению с основным материалом. Граничный слой или граничная пленка снижает силу трения по сравнению с трением без смазочного материала в 5-10 раз, а изнашивание сопряженных деталей – в десятки раз.

Практически все масла способны адсорбироваться на металлических поверхностях. Поверхностно-активные вещества присутствуют как в минеральных маслах, так и в смазочных материалах растительно-животного происхождения. В связи с этим практически все смазочные материалы образуют на металлических поверхностях граничную квазикристаллическую фазу с прочными связями с поверхностью и между молекулами в самом смазочном слое. Молекулы смазочного материала ориентируются перпендикулярно к твердой поверхности, в тангенциальном направлении молекулярные слои легко выгибаются и скользят друг по другу. На площадках фактического контакта может произойти взаимное внедрение поверхностей без нарушения целостности смазочной пленки.

Сопротивление перемещению при скольжении состоит из сопротивления сдвигу граничного слоя и сопротивления на срез внедренными объемами. Кроме того, при высоких местных нагрузках и температурах на отдельных участках может произойти разрушение смазочного слоя и, как следствие, адгезия и даже сцепление основных материалов. В результате большой подвижности молекул смазки и большой скорости процесса адсорбции поврежденные участки быстро «залечиваются», предотвращая развитие процесса схватывания. При граничном трении на поверхности всегда существуют зоны, где поверхности находятся на расстоянии, достаточном для наличия смазки с объемными свойствами. Эти области не играют определяющей роли при граничном

трении, поскольку при жидкостной смазке служат резервуарами для подпитки изношенной граничной пленки.

Эффективность смазочного действия, кроме адсорбции, зависит от химического взаимодействия основного и смазочного материалов. Жирные кислоты, вступая во взаимодействие с металлом, образуют химические пленки, которые способны выдерживать без разрушения значительные деформации. Для повышения химической активности в масло вводят химически активные присадки, которые в условиях высоких температур разлагаются, образуя на поверхности металла защитные пленки.

Смазочная пленка разделяет поверхности трения фрикционного контакта, уменьшая интенсивность изнашивания деталей. При жестких режимах эксплуатации, характерных для большинства современных узлов трения, контактные нагрузки разрушают полимолекулярный слой смазочного материала.

#### Постановка задачи

Таким образом, установлено, что работоспособность узла трения при граничной смазке определяется соотношением двух процессов: образования и разрушения граничного слоя. Соотношения между скоростями этих процессов характеризуют тот или другой этап процесса трения при граничной смазке. Критерием начала нового этапа является достижение соответствующей переходной температуры. На рис. 1 представлена обобщенная зависимость коэффициента трения от температуры контакта для сопряжения, которое работает в условиях граничной смазки.

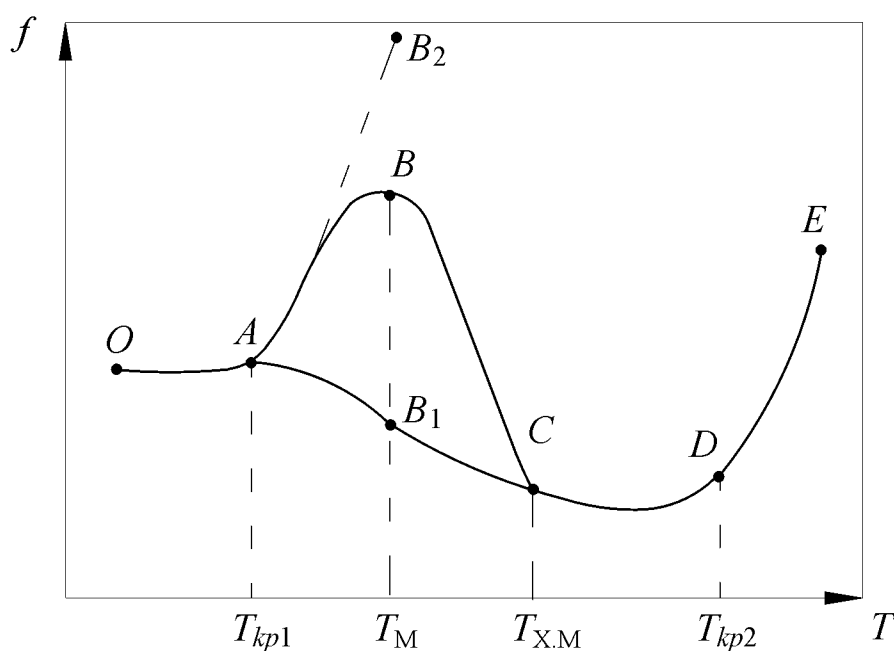


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента трения от температуры при граничной смазке

На начальном участке  $OA$  разделение поверхностей трения обеспечивается адсорбционным слоем. При этом коэффициент трения имеет небольшие значения (до 0,1) и происходит умеренное адгезионное изнашивание. При температуре  $T_{kp1}$  происходит термическое разрушение граничного смазочного слоя с интенсивным адгезионным изнашиванием в результате десорбционных процессов и дезориентации граничного слоя. Последующий рост температуры приводит к скачкообразному росту коэффициента трения и схватыванию поверхностей ( $B_2$ ). При наличии в масле химически-активных веществ, в результате фрикционного повышения температуры молекулы этих соединений разлагаются, а активные компоненты вступают в химические реакции с металлом поверхностей трения,

образуя модифицированные слои со сниженным сопротивлением сдвигу (при температуре для точки *B*). Разделяя поверхности трения, модифицированные слои предотвращают металлический контакт и этим самым предотвращают адгезионное изнашивание и заедание.

При температуре химической модификации  $T_{x.m}$  достигается равновесие между процессами образования и разрушения модифицированных слоев. При этом в достаточно широком диапазоне температур (участок *CD*) устанавливается низкий коэффициент трения. При температуре  $T_{кр2}$  скорость разрушения модифицированных слоев становится больше скорости их образования, что приводит к металлическому контакту и заеданию поверхностей.

Таким образом, критерием начала нового этапа является достижение соответствующей переходной температуры.

Температурно-кинетический метод позволяет определять значения переходных температур [4, 8].

При относительно невысоких температурах смазочное действие обеспечивается за счет граничных слоев, образованных поверхностно-активными молекулами смазочного материала и присадок к ним. Уравнения для определения переходных температур представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные зависимости для переходных температур

Переходные температуры		
$T_{кр1} = \frac{E_x + \Delta\mu}{R \ln \left[ \frac{b_1 \sigma}{c^n V^m H} \right]}$	$T_{x.m} = \frac{E_p}{R \ln \left[ \frac{b_2 c^n}{V^m} \right]}$	$T_{кр2} = \frac{E_x - E_p}{R \ln \left[ b_2 \frac{V^m \sigma}{c^n H_t} \right]}$
<p><math>E_x</math> – энергия активации образования связей;  <math>\Delta\mu</math> – разность химических потенциалов ПАВ в адсорбированном состоянии и объеме среды;  <math>R</math> – универсальная газовая постоянная;  <math>b_1, n, m</math> – константы трибосистемы;  <math>c</math> – концентрация ПАВ в смазочном материале;  <math>\sigma</math> – номинальное контактное давление;  <math>V</math> – относительная скорость скольжения;  <math>H</math> – твердость более мягкого компонента трибосистемы.  <math>E_p</math> – энергия активации процесса химического модифицирования.</p>		

Представленные уравнения переходных температур могут быть использованы при построении математических моделей процесса граничного смазывания трущихся поверхностей.

#### Построение математической модели граничного трения

Из устоявшихся уже положений [1 - 3] практическая любая трибосистема обладает свойствами для саморегулирования процессов, происходящих в ней, образования самоорганизующихся диссипативных структур. Возможность образования самоорганизующихся структур в природе теоретически обоснована [4, 5] и имеет важное значение для технических приложений. Трибологическая система, как правило, является термодинамически открытой, то есть обменивается энергией и веществом со средой. Процессы образования и разрушения адсорбированных и химически модифицированных пленок при граничном смазывании, очевидно, также следует рассматривать как самоорганизующиеся процессы в термодинамической системе трения.

Можно указать две области (рис.1), где имеет место процесс самоорганизации, т.е. условное равновесие между образованием пленки и ее разрушением.

Таким образом, имеет этапное движение граничной масляной пленки: образование адсорбированной масляной пленки - равновесие - разрушение адсорбированной пленки с одновременным образованием химической пленки - равновесие - разрушение химической пленки.

Если граничная смазочная пленка переходит от некоторого начального состояния к другому конечному или в промежуточное состояние, то вектор ее состояния  $q(x,t)$  можно выразить так:

$$q(x,t) = u(t)V(x), \quad (1)$$

где  $V(x)$  описывает некоторый пространственный порядок;

$u(t)$  – функция возмущения, зависящая от времени  $t$ .

В уравнении (1) параметр порядка  $\dot{u}$  определяется по формуле:

$$\dot{u} = \lambda u, \quad (2)$$

где  $\lambda$  – показатель И. Ляпунова.

При быстром изменении управляющего параметра  $\alpha$ , когда неравенство  $\lambda < 0$  быстро переходит в неравенство  $\lambda > 0$ , появляется переходной вектор состояния вида:

$$q(x,t) = e^{\lambda t} V(x). \quad (3)$$

Переходной вектор описывает некоторую обновленную структуру смазочной пленки, но не стремится к новому устойчивому состоянию.

На это влияют такие процессы, как диффузия, тепло- и массоперенос, реологические явления и др. Именно такие процессы и определяют самоорганизацию системы смазки.

В соответствии с принципом самоорганизации для возникновения перехода (3) внутри системы смазки должны существовать некоторые флуктуации в определенном сочетании (ПАВ, ХАВ, диффузия, взаимодиффузия, движение дислокаций, реология свойств и др.). При отсутствии флуктуаций решение  $u \equiv 0$  и, соответственно,  $q \equiv 0$  навсегда.

Тем не менее, следует предположить, что самоорганизация идет не только через переходы, но и через изменение числа компонент и через изменение управляющих параметров, как это вытекает из [5]. Согласно [10] эволюционное уравнение стохастического перехода от состояния  $q_1$  в состояние  $q_2$  описывается нелинейным уравнением вида:

$$\dot{q}_1 = \alpha q_1 + \beta q_1 q_2 + f(t), \quad (4)$$

где  $\alpha, \beta$  – управляющие параметры, которые задаются или определяются детерминированно;

$f(t)$  – "флуктуационные силы", которые определяются недетерминированно и делают эволюцию временной.

Если принять энтропию  $S$  за меру неопределенности состояния системы смазки, то с разбалансировкой температур вплоть до достижения  $T_{кр1}$  степень упорядоченности смазочной пленки уменьшается и инициируется процесс самоорганизации ее структуры вплоть до диффузии ("S - теорема", [10]).

Там же показано, что изменение энтропии  $S$  носит пульсирующий (колебательный) характер, который описывается уравнением:

$$\Delta T(S_1 - S_2) = \frac{\rho}{2} [(\delta v)^2] > 0, \quad (5)$$

где  $\Delta T$  – разность температур смазочной пленки и поверхностного слоя материала;

$S_1, S_2$  – энтропия состояний 1 и 2 соответственно;

$\delta v$  – пульсация скорости изменения структурного состояния смазочной пленки, [11].

В системе смазки производится энтропия, причем, одновременно с продуцированием энтропии внутри системы происходит теплообмен с внешней средой:

$$dS = d_i S + \frac{dQ}{T}, \quad (6)$$

где  $d_i S$  – энтропия, которая продуцируется внутри системы;

$\frac{dQ}{T}$  – поток тепла в системе смазки.

Продуцирование энтропии происходит с определенной скоростью и в условиях неравновесия всегда положительно, т.е.:

$$\frac{d_i S}{dt} > 0. \quad (7)$$

Если обозначить  $\sigma$  производство энтропии в единицу времени в единице объема смазочной пленки, то можно записать:

$$\frac{d_i S}{dt} = \int \sigma dV > 0. \quad (8)$$

Значение  $\frac{d_i S}{dt}$  фактически определяет скорость продуцирования энтропии, причем при тепло- и массопереносе эта скорость будет определенным образом изменяться. Энтропия  $dS$  продуцируется благодаря теплопроводности.

Вследствие разности температур  $\Delta T$  возникает поток энергии  $\frac{dE}{dt}$ , а движущей силой этого потока является теплопроводность системы смазки.

Основываясь на [11, 13], можно рекомендовать определение функции диссипации энтропии по зависимости:

$$\sigma = \frac{dE}{dt} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) = \frac{dE}{dt} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right). \quad (9)$$

Уравнение (9) представляет собой математическое описание термодинамического и синергетического толкование процесса образования граничных смазочных пленок.

К аналогичному выводу можно прийти и на основе теории информации. Как известно [12, 13], уменьшение энтропии ведет к увеличению информации о системе смазки и наоборот. В нашем случае такое увеличение информации выражается через реологические изменения внутри системы смазки, диффузию смазочной пленки и др. Это и есть объяснением такого феноменологического явления, как формирование граничных смазочных пленок. Численно связь информации о состоянии смазочной пленки с ее энтропией выражается известной формулой Шеннона [13, 15].

#### **Общие выводы**

1. На основе существующих положений о трении при граничном смазывании и основных термодинамических положений применительно к открытым трибологическим системам определены основные подходы по созданию структурно-термодинамической модели трения при граничном смазывании.

2. Разработана математическая модель процессов создания и разрушения смазочной пленки при граничном трении в зависимости от температуры на основе схемы создания адсорбированных и химически модифицированных граничных смазочных слоев.

#### **Список литературы**

1. Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. и др. Поверхностная прочность материалов при трении. — К.: "Техніка", 1976. — 296 с.
2. Бершадский Л.И. Структурная термодинамика трибосистемы. — К.: О-во "Знание" УССР, 1990. — 32 с.
3. Костецкий Б.И. Структурно-энергетические основы управления трением и износом в машинах. — К.: О-во "Знание" УССР, 1990. — 32 с.
4. Глендорф, Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации. — М.: Мир, 1973. — 280 с.

5. Хакен Г. Синергетика, иерархии неустойчивости в самоорганизующихся системах. — М.: Мир, 1985. — 419 с.
6. Смазочные материалы: Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: справочник/ Р.М. Матвеевский, В.Л.Лашхи, И.А.Буяновский и др. — М.: Машиностроение, 1989. —224 с.
7. Дыха О.В. Принципи побудови структурно-динамічної схеми при граничному змащуванні, Тези допов. міжнар. наук.-техн. конф. “Зносостійкість і надійність вузлів тертя машин (ЗНМ-2001)”. — Хмельницький: ТУП, 2001. — С. 52.
8. Материалы в триботехнике нестационарных процессов / А.В. Чичинадзе, Р.М. Матвеевский, Э.Д. Браун и др. — М.: Наука, 1986.
9. Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки / Р.М. Матвеевский, И.А. Буяновский, О.В. Лазовская. — М.: Наука, 1978.
10. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах / Пер. с англ. — М.: Мир, — 1979. — 597 с.
11. Синергетика: Сб. статей / Пер. с англ. // Под ред. Б.Б. Кадомцева. М.: Мир, — 1984. — 624 с.
12. Бокштейн Б.С. Атомы блуждают по кристаллу. — М.: Наука, 1984. — 207 с.
13. Волькенштейн М.В. Энтропия и информация. — М.: Наука. — 1986. — 191 с.
14. Таганов И.Н. Моделирование процессов массо- и энергопереноса. — Л.: Химия, 1979. — 204 с.
15. Цеснек Л.С. Механика и микрофизика истирания поверхностей. — М.: Машиностроение, 1979. — 263 с.

*A. Дыха, Т. Гедзюк*

#### **Математичне моделювання термодинамічних процесів граничного тертя**

Розроблена математична модель процесів створення і руйнування змащувальної плівки при граничному терті залежно від температури на основі схеми утворення адсорбованих і хімічно модифікованих граничних змащувальних шарів.

*A. Duhez, T. Gedzuyk*

#### **Mathematic modelling of thermodynamic processes of Boundary friction**

The mathematical model of processes of creation and destruction of a lubricant film is developed at boundary friction depending on temperature on the basis of the scheme of creation of the adsorbed and chemically modified boundary lubricant layers.

Одержано 18.05.10